

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-238924

(43)Date of publication of application : 31.08.1999

---

(51)Int. Cl. H01L 43/08

G01R 33/09

G11B 5/39

H01F 10/08

---

(21)Application number : 10-039343 (71)Applicant : TOSHIBA CORP

(22)Date of filing : 20.02.1998 (72)Inventor : INOMATA KOICHIRO  
SAITO YOSHIAKI  
KISHI TATSUYA

---

(54) SPIN-DEPENDENT TRANSMISSION ELEMENT ELECTRONIC COMPONENT USING THE SAME, AND MAGNETIC PART

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a spin-dependent transmission element, which is capable of obtaining an extremely large magnetic resistance change rate at a room temperature and which has an amplification function.

SOLUTION: A ferromagnetic layer 3 made of more than one layer, electrode layers 1 and 5 made of more than two layers, where at least one layer is constituted of a ferromagnetic body and dielectric layers (tunnel layers) 2 and 4 which are stacked and arranged between the ferromagnetic layer 3 and the electrode layers 1 and 5, and the multiple tunnel junctions of more than double junctions are provided. In a spin-dependent transmission element, a discrete energy level is formed for the ferromagnetic layer 3, and an electrode for controlling the energy level is provided. The multiple tunnel junction is formed via a granular magnetic layer having ferromagnetic fine particles distributed in a dielectric matrix is formed, and the discrete energy level based on

electrostatic energy in formed in the discrete energy level.

---

#### LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 31.03.2003

[Date of sending the examiner's  
decision of rejection]

[Kind of final disposal of  
application other than the  
examiner's decision of rejection or  
application converted registration]

[Date of final disposal for  
application]

[Patent number] 3556457

[Date of registration] 21.05.2004

[Number of appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

---

#### CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] Even if as few as an one or more-layer ferromagnetic layer Between the electrode layer more than two-layer [ which one layer turns into from a ferromagnetic ], and said ferromagnetic layer and an electrode layer So that the multiplex tunnel junction more than a duplex may be formed It consists of the dielectric or semi-conductor by which laminating arrangement was carried out said ferromagnetic layer and an electrode layer, and by turns. The tunnel layer more than two-layer is provided. The spin dependence conduction component characterized by having an electrode for the discrete energy level being formed in said ferromagnetic layer, and controlling said energy level.

[Claim 2] It has the ferromagnetic particle distributed in the dielectric matrix, and has coercive force. Between the granular magnetic layer of one or more layers, and said granular magnetic layers So that the multiplex tunnel junction more than a duplex may be formed

contiguity arrangement was carried out with said granular magnetic layer -- at least -- One layer consists of ferromagnetics. The electrode layer more than two-layer is provided. The spin dependence conduction component characterized by having an electrode for the discrete energy level based on electrostatic energy being formed in said granular magnetic layer, and controlling said energy level.

[Claim 3] In a spin dependence conduction component according to claim 1 or 2 Said multiplex tunnel junction is a spin dependence conduction component characterized by showing the spin dependence resonant tunnelling effect.

[Claim 4] The spin dependence conduction component characterized by making the magneto-resistive effect based on said spin dependence resonant tunnelling effect discover by changing the direction of one spin in a spin dependence conduction component according to claim 3 among the electrode layers which consist of said ferromagnetic layer and said ferromagnetic.

[Claim 5] The spin dependence conduction component characterized by making the magneto-resistive effect based on said spin dependence resonant tunnelling effect discover by changing the direction of one spin in a spin dependence conduction component according to claim 3 among the electrode layers which consist of said granular magnetic layer and said ferromagnetic.

[Claim 6] In a spin dependence conduction component according to claim 1 or 3 Said multiplex tunnel junction is a spin dependence conduction component characterized by having a current amplification operation.

[Claim 7] In a spin dependence conduction component according to claim 1 or 3 Spin dependence conduction component characterized by having 2 terminal component structure or 3 terminal component structure.

[Claim 8] Electronic parts characterized by providing the spin dependence conduction component of claim 1 thru/or claim 7 given in any 1 term.

[Claim 9] Magnetic parts characterized by providing the spin dependence conduction component of claim 1 thru/or claim 7 given in any 1 term.

[Claim 10] The magnetic head characterized by providing the spin dependence conduction component of claim 1 thru/or claim 7 given in any 1 term.

[Claim 11] The magnetic storage component characterized by providing the spin dependence conduction component of claim 1 thru/or claim 7 given in any 1 term.

---

## DETAILED DESCRIPTION

---

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the electronic parts and magnetic parts using the spin dependence conduction component and it which controlled from the outside the discrete energy level which started the magnetic cell using the tunnel effect of a ferromagnetic, and its application component, especially was formed into the ferromagnetic.

[0002]

[Description of the Prior Art] As a spin dependence conduction component, the giant magneto-resistance component (GMR component) is known until now. A magneto-resistive effect (MR) is the phenomenon in which electric resistance changes by adding a field to a certain kind of magnetic substance, and it is used for a field sensor, the magnetic head, etc. For example, it has the description that the magneto-resistive effect component (MR component) using a ferromagnetic is excellent in temperature stability, and its activity range is wide.

[0003] Before, thin films, such as a permalloy alloy, have been widely used for MR component using the magnetic substance. High density magnetic recording is attained by using this for the reproducing heads, such as a hard disk. However, magnetic-reluctance rate of change of a permalloy thin film About 2 - 3%, and since it was small, when it was going to attain the further high density record, there was a problem that sufficient sensibility was not obtained.

[0004] It has the structure which, on the other hand, carried out the laminating of a magnetic metal layer and the non-magnetic metal layer by turns with the period of the dozens of A order from several angstroms as a new ingredient in which a magneto-resistive effect is shown in recent years, and the artificial grid film which the magnetic moment of the magnetic layer which faces through a non-magnetic layer combined magnetically in the state of anti-parallel attracts attention as an ingredient in which giant magneto-resistance is shown. for example, the Fe/Cr artificial grid film (Phys.Rev.Lett.61, 2472 (1988)) and the Co/Cu artificial grid film (J. Mag.Mag.Mater.94, L1 (1991), Phys.Rev.Lett.66, 2152 (1991)) etc. -- it is found out.

[0005] Such metal artificial grid film is a number. Rather than the conventional permalloy alloy thin film of 10%, it is markedly alike and big magnetic-reluctance rate of change is shown. Such giant magneto-

resistance originates in dispersion of the electron which bears conduction being dependent on the sense of the spin of a magnetic layer. However, for such metal artificial grid film, a saturation field (field with which resistance is saturated) is [ the problem that it is necessary to make / many / the number of laminatings in order to acquire a big magneto-resistive effect, and ] several teslas (T). With the above, it is large and, the way things stand, has the problem of being unsuitable for application to the magnetic head etc.

[0006] The so-called spin bulb film to which whenever [ two angular relation / of the magnetization direction of a ferromagnetic layer ] is changed is developed by having the cascade screen of the sandwich structure of a ferromagnetic layer / non-magnetic layer / ferromagnetic layer, exerting exchange bias on one ferromagnetic layer in order to make a saturation field small, fixing magnetization, and carrying out flux reversal of the ferromagnetic layer of another side by the external magnetic field. However, magnetic-reluctance rate of change the spin bulb film Since [ which is not not much large ] the specific resistance of a cascade screen itself is as small as several 10 microohm-cm, in order to detect an external magnetic field with about 4 - 8%, it has the problem that it is necessary to pass a comparatively big current.

[0007] Moreover, utilization of the so-called vertical magneto-resistive effect which passes a current perpendicularly to a film surface to a multilayer knows a very big magneto-resistive effect or being obtained (Phys. Rev. Lett. 66, 3060 (1991)). However, if current pass is small in this case, and resistance is small since each class is a metal, and micro processing is not carried out to below submicron ones, there is a problem that the magneto-resistive effect in a room temperature cannot be measured.

[0008] Furthermore, it is found out that the giant magneto-resistance based on the conduction which depended also for the so-called granular magnetic film on spin which distributed the magnetic ultrafine particle in the non-magnetic metal matrix is shown unlike artificial grid film which was described above (Phys. Rev. Lett. 68, 3745 (1992)). In the condition that such a granular magnetic film does not add a field, with the property of a magnetic ultrafine particle, the spin of each magnetic ultrafine particle turns to an irregular direction mutually, if it is high, and resistance adds a field and arranges each spin in the direction of a field, resistance will fall and, as a result, a \*\*\*\*\* magneto-resistive effect will discover it to spin dependence dispersion. However, in order that the magnetic ultrafine particle in this case may show superparamagnetism, the saturation field has the problem of being

essential very large.

[0009] On the other hand, with spin dependence dispersion, the giant magneto-resistance based on the ferromagnetic tunnel effect which differs in a mechanism is found out. This is a ferromagnetic layer / insulating layer / ferromagnetic layer. It consists of a three-layer cascade screen, and in the structure where the coercive force of one ferromagnetic layer is smaller than the coercive force of the ferromagnetic layer of another side, an electrical potential difference is impressed between both ferromagnetism layers, and tunnel current is generated. if only the spin of the small magnetic layer of coercive force is reversed at this time -- the time when the spin of two ferromagnetic layers is mutually parallel -- anti- -- since tunnel current differs greatly in the time [ \*\*\*\* ], giant magneto-resistance is obtained.

[0010] Structure is easy and, moreover, such a ferromagnetic tunnel junction component is at a room temperature. There is the description that about 20% of big magnetic-reluctance rate of change is acquired. However, in order to make the tunnel effect discover, it is necessary to make insulating layer thickness thin with several nm or less, and since it is difficult, it being stabilized moreover in homogeneity and producing such a thin insulating layer to it has the problem that the variation in resistance or magnetic-reluctance rate of change will become large. Moreover, when resistance of an insulating layer was too high and it is made detailed in order to use this for the magnetic head etc., generally the high-speed operation of a component is not obtained, and a noise increases, and problems -- the large component of a S/N ratio is not obtained -- are predicted.

[0011] On the other hand, the magnetic storage component using the spin bulb film or a ferromagnetic tunnel junction is also known. In this case, one side is used as a recording layer between two magnetic layers, and another side is used as the read-out layer. Therefore, in any [ of record and playback ] case, it is necessary to reverse spin, and the current source for field impression for it is needed for it.

[0012] Furthermore, the ferromagnetic was used. What is called 3 terminal component and the so-called spin transistor is known. This is the metal magnetic substance / metal non-magnetic material / metal magnetic substance. It has the three-tiered structure. if an electrical potential difference is impressed between the 1st metal magnetic substance and metal non-magnetic material -- the time when the output voltage has [ that output voltage occurs between the 2nd metal magnetic substance and metal non-magnetic material ] the mutually parallel spin

of the 1st and 2nd metal magnetic substance -- anti- -- magnitude is the same at the time [ \*\*\*\* ], and a sign becomes reverse (J.

Appl.Phys.79.4727 (1996)) However, since the whole of this spin transistor is made of the metal, output voltage is dramatically as small as nanovolt extent, and it does not have the current amplification operation.

[0013] Moreover, it is found out that a magneto-resistive effect increases according to the coulomb BUROKKEDO effectiveness recently (J. Phys.Soc.Jpn.66, 1261 (1997)). It has a small capacity. It sets to a double tunnel junction and is an electron. It is  $E_c$ , if energy increases and only  $E_c = e^2 / 2 C$  of  $C$  are small, when one piece is made to tunnel. It becomes very large and is an electron. It cannot tunnel, also although it is called one piece. This is called coulomb BUROKKEDO. However, high order tunnel current flows also in the state of such coulomb BUROKKEDO, and this is called a common tunnel. In this condition, it is resistance. Since it is proportional to the product of two tunnel junction resistance, a magneto-resistive effect increases.

[0014] From the former, the semiconductor device is known as a component using conduction of an electron or a hole, and it is used in very many fields, such as various electronic circuitries, memory devices, etc. However, a semiconductor device uses only electronic charge and electronic spin is not used.

[0015] Moreover, the component using the so-called resonant tunnelling effect which a discrete energy level is formed in a metal layer or a semi-conductor layer, and carries out tunnel conduction via the energy level in the cascade screen which consists of a terrorism epitaxial layer to a metal layer, a dielectric layer, or different one of a semi-conductor is also known. However, these components also use only electronic charge and electronic spin is not used.

[0016]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] As mentioned above, each of semiconductor devices using old electronic conduction and resonant tunnelling effect components uses only electronic charge, and electronic spin is not used.

[0017] On the other hand, as a conduction component using electronic spin, the spin bulb component which shows giant magneto-resistance, the magnetometric sensor using it, the magnetic head, the magnetic storage component, the magnetic head, a magnetic storage component using a ferromagnetic tunnel junction, etc. are known. Magnetic-reluctance rate of change these Less than 10% and since it is small, a limitation is in playback sensibility, and it has the problem that output voltage is

small. Especially, in any [ of record and playback ] case, it is necessary to reverse spin, and there is complicatedness that the current source for the field impression for it is needed, with a magnetic storage component.

[0018] Moreover, the metal magnetic substance / metal non-magnetic material / metal magnetic substance The former which has a three-tiered structure Output voltage is extremely small, and utilization is difficult and, as for 3 terminal component (spin transistor component), it does not have a current amplification operation, either.

[0019] The conventional electronic conduction component is using the discrete energy level which offers the electronic conduction component using the spin of a completely different electron, and was moreover formed into the magnetic substance, and this invention aims at offering the spin dependence conduction component which gave the magnification function, when very big magnetic-reluctance rate of change is acquired at a room temperature and controls the discrete energy level by the electrical potential difference further. Furthermore, it aims at offering the electronic parts and magnetic parts using such a spin dependence conduction component.

[0020]

[Means for Solving the Problem] this invention persons found out that magnetic reluctance was substantially controllable by controlling tunnel current, as a result of advancing research on the magnetic cell which passes tunnel current between the granular magnetic layer which distributed the ferromagnetic particle in the dielectric matrix, and the ferromagnetic layer by which contiguity arrangement was carried out at this granular magnetic layer. Furthermore, it verified that this was what makes the spin dependence resonant tunnelling effect the origin. This invention is based on such knowledge and a verification result.

[0021] The above-mentioned spin dependence resonant tunnelling effect, It is based on the multiplex tunnel junction more than a duplex.

Therefore, when a granular magnetic layer is used, the same effectiveness is acquired also in the multiplex tunnel junction which consists of the ferromagnetic layer, the dielectric layer or the ferromagnetic layer, and semi-conductor layer of an except. In order for the spin dependence resonant tunnelling effect to be discovered, a discrete energy level must be formed in at least one of the ferromagnetics in a multiplex tunnel junction.

[0022] This invention offers the spin dependence conduction component which prepared the electrode which controls by foreign voltage discrete energy semi- \*\* produced in the ferromagnetic layer (or granular



magnetic layer), and the application components and application equipment using it based on new knowledge which was described above.

[0023] Namely, the 1st spin dependence conduction component in this invention as [ indicated / to claim 1 ] -- an one or more-layer ferromagnetic layer -- at least -- One layer consists of ferromagnetics. Between the electrode layer more than two-layer, and said ferromagnetic layer and an electrode layer So that the multiplex tunnel junction more than a duplex may be formed It consists of the dielectric or semi-conductor by which laminating arrangement was carried out said ferromagnetic layer and an electrode layer, and by turns. It is characterized by having an electrode for providing the tunnel layer more than two-layer, and the discrete energy level being formed in said ferromagnetic layer, and controlling said energy level.

[0024] The 2nd spin dependence conduction component in this invention As indicated to claim 2, it has the ferromagnetic particle distributed in the dielectric matrix, and has coercive force. The granular magnetic layer of one or more layers, Between said granular magnetic layers So that the multiplex tunnel junction more than a duplex may be formed contiguity arrangement was carried out with said granular magnetic layer -- at least -- One layer consists of ferromagnetics. The electrode layer more than two-layer is provided. It is characterized by having an electrode for the discrete energy level based on electrostatic energy being formed in said granular magnetic layer, and controlling said energy level.

[0025] As the spin dependence conduction component of this invention was indicated to claim 3, said multiplex tunnel junction is characterized by showing the spin dependence resonant tunnelling effect. Furthermore, the magneto-resistive effect based on the spin dependence resonant tunnelling effect is made to discover by changing the direction of one spin among the electrode layers which consist of said ferromagnetic layer (or granular magnetic layer) and said ferromagnetic, as indicated to claim 4 and claim 5. Furthermore, the spin dependence conduction component of this invention can also be made into which structure of 2 terminal component structure and 3 terminal component structure as indicated to claim 7.

[0026] Moreover, the electronic parts and magnetic parts of this invention are characterized by providing this invention spin dependence conduction component mentioned above, as indicated to claim 8 and claim 9. Similarly, the magnetic head and the magnetic storage component of this invention are characterized by providing this invention spin dependence conduction component mentioned above, as indicated to claim

10 and claim 11.

[0027]

[Embodiment of the Invention] Hereafter, the gestalt for carrying out this invention is explained.

[0028] First, the spin dependence resonant tunnelling effect which is to the basic configuration of the spin dependence conduction component of this invention and the bases of this invention is explained. In addition, since it is easy below The case where a dielectric is moreover used about a double tunnel junction is shown. It can consider easily that this result can be extended when a multiplex tunnel junction and a semiconductor are used. Drawing 1 (a) is drawing showing the basic configuration of the 1st spin dependence conduction component of this invention. The spin dependence conduction component shown in drawing 1 (a) has the cascade screen which consists of the 1st ferromagnetic layer 1 / dielectric layer 2 / the 2nd ferromagnetic layer 3 / dielectric layer 4 / the 3rd ferromagnetic layer 5. dielectric layers 2 and 4 are minded in this cascade screen -- the double tunnel junction is formed between the three-layer ferromagnetic layers 1 and 3 and 5.

[0029] The 1st and 3rd ferromagnetic layers 1 and 5 are electrode layers among the three-layer ferromagnetic layers 1, 3, and 5. In addition, the electrode layer (5) which is equivalent to the outlet side of tunnel current may consist of not only a ferromagnetic but non-magnetic metal etc. so that it may mention later. moreover, the 2nd ferromagnetic layer 3 -- two thin dielectric layers 2 and 4 -- namely, -- It is inserted by two tunnel layers, and it is constituted so that tunnel current may flow between the 1st ferromagnetic layer 1 and the 3rd ferromagnetic layer 5 through each dielectric layers 2 and 4, respectively. In addition, six in drawing is an electrode.

[0030] In such structure, when the 2nd ferromagnetic layer 3 is thin enough, as shown in drawing 1 (b), the discrete energy level for which it depended on spin according to the quantum effectiveness at the 2nd ferromagnetic layer 3 is formed. That is, the discrete energy level of the 2nd ferromagnetic layer 3 is carrying out spin fission for the exchange interaction, and, only in the part of exchange energy  $\gamma$ , energy differs with upward spin (\*\*) and downward spin (\*\*).

[0031] As shown in drawing 1 (a), while impressing an electrical potential difference between the 1st ferromagnetic layer 1 and the 2nd ferromagnetic layer 3 now, the electrical potential difference of a reverse sign is impressed between the 2nd ferromagnetic layer 3 and the 3rd ferromagnetic layer 5. Then, tunnel current flows between the 1st ferromagnetic layer 1 and the 2nd ferromagnetic layer 3 through the thin

dielectric layer (tunnel layer) 2. and the time of the electrical potential difference  $V$  applied to the 1st ferromagnetic layer 1 and the 3rd ferromagnetic layer 5 being a suitable value -- inside of the discrete energy level of the upward spin in the 2nd ferromagnetic layer 3 (\*\*), or downward spin (\*\*). One ( drawing 1 (b) \*\*) spin is set to the same level (resonance state) as the energy of the conduction electron of the 1st ferromagnetic layer 1.

[0032] If it does so, tunnel conduction of the conduction electron in the 1st ferromagnetic layer 1 with the spin of a discrete energy level and the spin of the same direction in a resonance state can be carried out from the 1st ferromagnetic layer 1 to the 3rd ferromagnetic layer 5 with 100% of permeability, without being reflected by dielectric layers 2 and 4. On the other hand, with it, tunnel conduction of the conduction electron with reverse spin cannot be carried out. This is the spin dependence resonant tunnelling effect.

[0033] In a ferromagnetic, only the electron near the Fermi level contributes to conduction, and, moreover, the number of the conduction electron changes with spin. therefore, the time when magnetization of the 1st ferromagnetic layer 1 and the 2nd ferromagnetic layer 3 is mutually parallel -- anti- -- pass resonance level in the time [ \*\*\*\* ] -- the number of the electrons to tunnel differs. So, if magnetization of the 2nd ferromagnetic layer 3 is fixed, for example and magnetization of the 1st ferromagnetic layer 1 is reversed, since tunnel current differs greatly in both, the very big magneto-resistive effect based on the spin dependence resonant tunnelling effect is acquired. The electrode layer which consists of the 3rd ferromagnetic layer 5 can use the electrode layer which consists not only of a ferromagnetic but of non-magnetic metal etc. that what is necessary is just that to which tunnel current may flow.

[0034] Drawing 1 is equivalent to the transistor which used the semiconductor, and the base and the 3rd ferromagnetic layer (or nonmagnetic electrode layer) 5 correspond [ the 1st ferromagnetic layer 1 / an emitter and the 2nd ferromagnetic layer 3 ] to a collector. That is, if an electrical potential difference  $V_{EB}$  is impressed to an emitter (1) and the base (3), it is base current  $I_B$ . If it flows and reverse voltage  $V_{CB}$  is impressed to the base (3) and a collector (5), it is collector current  $I_C$ . It flows. Collector current  $I_C$  Base current  $I_B$  It becomes large and a current amplification operation is shown.

[0035] Although the spin of the 2nd ferromagnetic layer 3 explained parallel and the case of anti-parallel to the spin of the 1st ferromagnetic layer 1 until now, when an include angle  $\theta$  is

generally made Since the tunnel current proportional to  $\cos\theta$  is acquired,  $\theta$  is [ whenever / angular relation / of spin ] detectable with a current value. Thus, by controlling bias voltage VCB, the sense of spin can be determined and a current amplification operation can be acquired. By these functions, the spin dependence conduction component of this invention can be called spin transistor in true semantics.

[0036] The 1st spin dependence conduction component of this invention can also be considered as the configuration which prepared the electrode for impressing bias voltage to the 2nd ferromagnetic layer 3 like the field effect transistor (FET) in a semiconductor device. Drawing 2 shows an example of such a configuration. The electrode 7 for impressing bias voltage is formed in the 2nd ferromagnetic layer 3. In such a configuration, an electrical potential difference is impressed between the 1st ferromagnetic layer (1st electrode layer) 1 and the 3rd ferromagnetic layer (you may be the 2nd electrode layer / non-magnetic layer). Tunnel current A sink, A spin dependence resonance state can be produced by impressing bias voltage to the 2nd ferromagnetic layer 3 from an electrode 7, and controlling the discrete energy level of the 2nd ferromagnetic layer 3 (shift).

[0037] Furthermore, ferromagnetic layer which forms a discrete energy level in the 1st spin dependence conduction component of this invention ( drawing 1 2nd ferromagnetic layer 3) It is not what is restricted to one layer. for example, as shown in drawing 3 , while making the middle ferromagnetic layer 3 into multilayer structure (3a, 3b, --3n), laminating arrangement of each [ these ] ferromagnetic layers 3a and 3b and the --3n is carried out a dielectric layer 9 and by turns -- it can also consider as the configuration which has three-fold or more multiplex tunnel junction. Therefore also in such a configuration, a spin dependence resonance state can be produced with controlling the discrete energy level of the middle ferromagnetic layer 3.

[0038] It is not that to which especially the component of the ferromagnetic layers 1, 3, and 5 is limited in the spin dependence conduction component shown in drawing 1 -3. Fe, Co which show the Fe-nickel alloy represented by the permalloy and ferromagnetism, Half metal, such as a Heusler alloy like the alloy containing nickel and them, NiMnSb, and PtMnSb, Various ferromagnetic ingredients can be used from various soft magnetic materials, such as half metal of oxide systems, such as CrO<sub>2</sub>, magnetite, and Mn perovskite, and an amorphous alloy, to hard magnetic materials, such as a Co-Pt alloy, a Fe-Pt alloy, and a transition-metals-\*\*\*\* alloy.

[0039] Moreover, in order to change only the direction of the spin of

the 1st ferromagnetic layer 1 among the 1st and 2nd ferromagnetic layers 1 and 3, the difference of the coercive force of a ferromagnetic may be used, and laminating arrangement of the antiferromagnetism film is carried out, and you may make it fix magnetization of a ferromagnetic layer by switched connection. On thickness and a concrete target in which the discrete energy level for which it depended on spin according to the quantum effectiveness as the thickness of the 2nd ferromagnetic layer 3 was mentioned above is formed It considers as 5nm or less extent. that to which especially the thickness of the 1st and 3rd ferromagnetic layers 1 and 5 is limited -- it is not -- for example, -- It is desirable to be referred to as about 0.1-100nm.

[0040] Furthermore, although the operation gestalt mentioned above explained the case where dielectric layers 2 and 4 were used as a tunnel layer, even if it replaces with these dielectric layers 2 and 4 and uses a semi-conductor layer as a tunnel layer, the same spin dependence conduction component can be constituted, and same operation and effectiveness are acquired. Especially the dielectric and semi-conductor that are used as a tunnel layer are not limited, and can use various dielectric materials and semiconductor materials. Moreover, thickness of a tunnel layer It is desirable to be referred to as about 0.5-5nm.

[0041] At the operation gestalt mentioned above, they are a ferromagnetic and a dielectric (or semi-conductor). Although the spin dependence conduction component which has a multiplex tunnel junction more than a duplex was explained, when the granular magnetic layer which distributed the ferromagnetic particle is used into a nonmagnetic dielectric matrix, the same spin dependence resonant tunnelling effect can be obtained at a room temperature. This is the 2nd spin dependence conduction component of this invention.

[0042] That is, the spin dependence conduction component shown in drawing 4 (a) has the cascade screen which consists of the 2nd electrode layer 13 which consists of the 1st electrode layer 11 / granular magnetic layer 12 / non-magnetic material which consists of a ferromagnetic. In this cascade screen, the granular magnetic layer 12 is a ferromagnetic which the ferromagnetic particle 15 is distributed, and this granular magnetic layer 12 does not show superparamagnetism, but has the coercive force of finite in the dielectric matrix 14. This granular magnetic layer 12 is pinched and contiguity arrangement of the 1st electrode layer 11 and the 2nd electrode layer 13 is carried out, and it is constituted so that tunnel current may flow, respectively between the 1st electrode layer 11, the granular magnetic layer 12 and the granular magnetic layer 12, and the 2nd electrode layer 13. That is,

it is between the granular magnetic layer 12 and the electrode layers 11 and 13. The double tunnel junction is formed.

[0043] In addition, the 2nd electrode layer 13 may consist of not only non-magnetic material but ferromagnetics. Namely, what is necessary is for the 1st electrode layer 11 just to consist of ferromagnetics at least among the 1st and 2nd electrode layers 11 and 13. Moreover, the insulator layer of the thickness which is extent to which tunnel current flows may be made to intervene not only among the electrode layers 11 and 13 and the granular magnetic layer 12 carrying out direct laminating arrangement but among them.

[0044] In such structure, it lets the electrode 16 prepared in the granular magnetic layer 12 pass, and an electrical potential difference VEB is impressed between the 1st electrode layer (ferromagnetic) 11 and the granular magnetic layer 12. And the electrical potential difference VCB of a reverse sign is impressed between the granular magnetic layer 12 and the 2nd electrode layer (non-magnetic material) 13. Here, the magnitude of the ferromagnetic particle 15 in the granular magnetic layer 12 is fully small, and since the dielectric matrix 14 surrounds the perimeter, the coulomb BUROKKEDO effectiveness quantizes, as shown in drawing 4 (b) for electrostatic energy  $E_c = e^2 / 2C$  ( $e$  is electronic charge and  $C$  is the capacity of a particle), and the energy level of the ferromagnetic particle 15 becomes discrete according to it.

[0045] Therefore, impression of bias voltage VCB of a suitable value forms resonance tunnel level between a granular magnetic layer and the 1st electrode layer (ferromagnetic layer) 11 like the 1st operation gestalt mentioned above. And if magnetic reluctance is small and separates from resonance when it is in a resonance state, a big magneto-resistive effect will be acquired according to the coulomb BUROKKEDO effectiveness. Therefore, if it controls to remove the electrostatic energy level of a magnetic particle from a resonance state with an electrode 16, for example, magnetization of the granular magnetic layer 12 is fixed and magnetization of the ferromagnetic layer 11 is reversed, since tunnel current differs greatly in both, a very big magneto-resistive effect is acquired.

[0046] On the other hand, if it controls by the electrode 16 according to a resonance state for the electrostatic energy level of a magnetic particle, the coulomb BUROKKEDO effectiveness will disappear and a magneto-resistive effect will decrease. Thus, the new function in which a magneto-resistive effect is controllable by controlling the electrical potential difference applied to an electrode 16 can be given.

[0047] Also in the 2nd spin dependence conduction component, whenever

[ angular relation / of the spin of the ferromagnetic layer 11 and the granular magnetic layer 12 ] is detectable like the 1st spin dependence conduction component mentioned above. Moreover, as shown in drawing 5 , it can also consider as the structure which formed the electrode 17 for impressing bias voltage to the granular magnetic layer 12 formed on the substrate 18 which has an insulating layer 19 in the front face. That is, a resonance state can be produced by impressing an electrical potential difference between the 1st electrode layer 11 and the 2nd electrode layer 13, impressing bias voltage to the granular magnetic layer 12 for tunnel current from a sink and an electrode 17, and controlling the discrete energy level in the granular magnetic layer 12. Under the present circumstances, the granular magnetic layer 12 may form the quantum dot by the single ferromagnetic particle, as shown in drawing 6 . The same is said of the component shown in drawing 4 .

[0048] Furthermore, in the 2nd spin dependence conduction component of this invention, it is also possible to apply the cascade screen which a granular magnetic layer is not restricted to one layer, and carried out the multilayer laminating of a granular magnetic layer and the ferromagnetic layer further. Therefore also in such a configuration, a spin dependence resonance state can be produced with controlling the discrete energy level of a granular magnetic layer.

[0049] In the spin dependence conduction component shown in drawing 4 - drawing 6 , the granular magnetic layer 12 does not show superparamagnetism, and since it is a ferromagnetic which has the coercive force of finite, it does not have the problem that a saturation field like the conventional granular GMR ingredient is large. Moreover, since the granular magnetic layer 12 is distributing the magnetic particle 15 in the dielectric matrix 14, compared with a ferromagnetic tunnel junction with a dielectric layer, its electric resistance is small, and it has the description that electric resistance is controllable to a suitable value, by controlling the die length of the current pass direction (the direction of thickness, or film surface inboard) of the granular magnetic layer 12, the rate of volume filling of the magnetic particle 15, magnitude, a distributed condition, etc. further. For this reason, according to application, the electric resistance of a spin dependence conduction component can be adjusted easily.

[0050] The granular magnetic layer 12 needs to have not a superparamagnetism object but the coercive force of finite, as mentioned above. Since coercive force generally becomes quite small in the granular magnetic material which distributed the magnetic particle

compared with bulk into a dielectric matrix, in order to prevent it, it is desirable to use Co especially with a large magnetic anisotropy, a Co-Pt alloy, a Fe-Pt alloy, transition-metals 1 rare earth alloy, etc. for the magnetic particle 15. Moreover, as for the semantics which makes a tunnel obstruction regularity to these magnetic particles 15, having arranged in the shape of a layer is desirable. These You may make it arrange more than two-layer.

[0051] Moreover, when coercive force uses the granular magnetic material which is not not much large, contiguity arrangement of the hard magnetism film of a couple may be carried out to the both ends of a granular magnetic layer, and spin may be fixed by impressing a bias field from this hard magnetism film. As bias field impression film, not only the hard magnetism film but antiferromagnetism film, such as FeMn and IrMn, can also be used.

[0052] On the magnitude of extent from which the particle size of the magnetic particle 15 in the granular magnetic layer 12 does not become superparamagnetism, and a concrete target It is desirable to be referred to as 1nm or more. However, since grain child spacing with the magnetic, not much large particle 15 increases, as for the particle size of the magnetic particle 7, it is desirable to consider as 10nm or less extent. As for spacing of the magnetic particle 15, tunnel current should flow among them. It is desirable to consider as 5nm or less extent.

[0053] moreover -- as the dielectric matrix 14 -- aluminum 2O3, SiO2, MgO, mugF2, Bi 2O3, AlN, and CaF2 etc. -- various dielectric materials can be used and the granular magnetic layer 12 is obtained by distributing the magnetic particle 15 which was described above in such a dielectric film. In addition, although the deficit of each element generally exists by the above-mentioned oxide film, the nitride, and the fluoride film, even if it is such a dielectric film, it is satisfactory in any way.

[0054] On the other hand, that what is necessary is just to have size relation in coercive force between the granular magnetic layers 12 as a ferromagnetic layer 11 For example, the Fe-nickel alloy represented by the permalloy, Fe which shows ferromagnetism, Half metal, such as a Heusler alloy like the alloy containing Co, nickel, and them, NiMnSb, and PtMnSb, Various ferromagnetic ingredients can be used from various soft magnetic materials, such as half metal of oxide systems, such as CrO2, magnetite, and Mn perovskite, and an amorphous alloy, to hard magnetic materials, such as a Co-Pt alloy, a Fe-Pt alloy, and a transition-metals-\*\*\*\* alloy.

[0055] For example, since an energy gap exists in one spin band, half



metal contributes only an electron with the spin of an one direction to conduction. Therefore, a bigger magneto-resistive effect can be acquired by using such an ingredient as a ferromagnetic layer 11. In addition, when using a ferromagnetic for the 2nd electrode layer 13, it is not necessary to be the not necessarily same ingredient as the 1st electrode layer (ferromagnetic) 11, and there should just be a difference between the granular magnetic layer 12 and coercive force.

[0056] The ferromagnetic layer 11 has been arranged not only through monolayer structure but through a non-magnetic layer. You may be the cascade screen which it has [ cascade screen ] two ferromagnetic layers, and combined magnetization of these ferromagnetism layer so that it might become anti-parallel mutually. According to the cascade screen combined with such anti-parallel, it can prevent magnetic flux leaking outside from a ferromagnetic layer, and it can be called desirable gestalt. What is necessary is to carry out the laminating of a ferromagnetic layer and the non-magnetic layer by turns, and just to use switched connection and magnetostatic association, in order to obtain the ferromagnetic layer combined with such anti-parallel.

[0057] Furthermore, the cascade screen which carried out the laminating of a ferromagnetic layer and the semi-conductor layer by turns can also be used as a ferromagnetic layer 11. In this case, since spin can be reversed by heat or optical exposure, there is the description that a field becomes unnecessary. That is, it records, for example with light or heat, and new memory read by impressing bias voltage can be realized. As a semi-conductor used for such a cascade screen, the FeSi alloy of B20 structure, beta-FeSi 2, GaAs, etc. can be used.

[0058] As for the granular magnetic layer 12 and the ferromagnetic layer 11, it is desirable to have uniaxial magnetic anisotropy in a film surface, respectively. By this, while being able to start steep flux reversal, it is stabilized and a magnetization condition can be held. Especially these are effective when applying to a magnetic storage component. Moreover, thickness of the granular magnetic layer 12 and the ferromagnetic layer 11 It is desirable to consider as the range of 0.5 to 100 nm. Among these, although the thinner possible one of the thickness of the granular magnetic layer 12 is desirable, what is necessary is just 50nm or less that what is necessary is just the thickness which can maintain uniform thickness on production and does not do an adverse effect to tunnel current.

[0059] It sets in each operation gestalt mentioned above, and they are the 1st [ of this invention ], and 2nd spin dependence conduction components. Although the case where it used as a 3 terminal component

was mainly explained, it is the spin dependence conduction component of this invention. It can also consider as 2 terminal component. For example, in the spin dependence conduction component shown in the spin dependence conduction component shown in drawing 1 - drawing 3 and drawing 4 - drawing 5 , if an electrical potential difference is impressed between the 1st and 2nd electrode layers (between ferromagnetic layers or between a ferromagnetic layer and a non-magnetic layer) and a current in the meantime is measured, when applied voltage is a suitable value, a spin dependence resonance state can be produced. thus, the spin dependence conduction component of this invention -- 2 terminal component structure -- and -- It is applicable to all of 3 terminal component structure.

[0060] As explained above, the spin dependence conduction component of this invention has a current amplification operation, and its bias voltage is dramatically small compared with a semi-conductor transistor, therefore can save the power of it. Moreover, since the metal is used fundamentally, there is many conduction electron overwhelmingly compared with a semi-conductor. Therefore, since there are many carriers even if component size makes it detailed, it has the description of being satisfactory. Since the spin dependence conduction component of this invention has the same function as the transistor not only using the magnetic parts using magneto-resistive effects, such as the magneto-resistive effect mold magnetic head, a field sensor, and a magnetic storage component, and electronic parts but a semi-conductor, it can be applied to electronic parts and the electronic instrument of the versatility for which the semi-conductor has been used. Moreover, it is also possible to use it combining the conventional semiconductor devices, such as a semi-conductor transistor.

[0061] next, refer to drawing 7 and drawing 8 about the concrete component structure of the spin dependence conduction electron of this invention -- 3 terminal component is explained as an example. In addition, although drawing 7 and drawing 8 showed the spin dependence conduction component which used the granular magnetic layer, the spin dependence conduction component by which a discrete energy level is formed in a ferromagnetic layer can also be made into the same component structure.

[0062] First, it is shown in drawing 7 . As for the spin dependence conduction electron of 3 terminal structures, the laminating of a conductor layer 22, the ferromagnetic layer 23 (23a, 23b), the granular magnetic layer 24, and the metal layer 25 is carried out to order on the substrate 21. That is, it has the structure where the granular magnetic

layer 24 was pinched with ferromagnetic layer 23a and the gate electrode 25.

[0063] Here, ferromagnetic layer 23b does not need to impress a bias field to ferromagnetic layer 23a, does not need to give the function which makes the coercive force small, and does not need to form it especially. By changing the sense of the current passed to it, a conductor layer 22 has the role which controls the sense of the spin of the ferromagnetic layer 23. In the granular magnetic layer 24 Bias voltage is impressed with two electrodes 26 and 27. In addition, it is the insulator layer to which 28 in drawing served as the insulator layer, and 29 served as the protective coat. In addition, on the other hand, an electrode 26, 26' and an electrode 27, and 27' may be chisels, respectively.

[0064] The magnetic particle in the granular magnetic layer 24 has small size, therefore the discrete energy level based on electrostatic energy is formed of the coulomb BUROKKEDO effectiveness. In such structure, if an electrical potential difference is impressed between an electrode 27 and an electrode 26 (or between electrode 27' and electrode 26'), tunnel current will flow. and -- if bias voltage is impressed to the gate electrode 25 -- the electrostatic energy level of the granular magnetic layer 24 -- control \*\*\*\* -- things are made.

[0065] Under the present circumstances, if bias voltage is controlled to a suitable value, as mentioned above, the discrete energy level formed in the granular magnetic layer 24 shifts, and it can set up so that it may differ from the energy of the conduction electron of the ferromagnetic layer 23. And a big magneto-resistive effect is acquired by reversing the spin of the ferromagnetic layer 23. On the other hand, if a discrete energy level is controlled on the energy and this level of a missions electron of the ferromagnetic layer 23, the resonant tunnelling effect will arise and magnetic reluctance will decrease greatly at this time. That is, the sense of spin can be judged from the magnitude of tunnel current only by impressing bias voltage, without impressing an external magnetic field.

[0066] Although drawing 7 is the component structure which carried out the laminating of a ferromagnetic layer and the granular magnetic layer perpendicularly to the substrate side, as shown in drawing 8 , it is also possible to consider as the structure where pinched the granular magnetic layer 24 with the electrode (30a, 30b) with which at least one side consists of a ferromagnetic, and they have been arranged to a substrate side at the Purana mold. In this case, an insulating layer 31 is formed in substrate 21 front face, and the granular magnetic layer 24

is formed through this insulating layer 31. On this granular magnetic layer 24, an electrode 33 is formed through the thin insulating layer 32, and bias voltage is impressed between an electrode 33 and a substrate 21. This is equivalent to FET as used in the field of a semi-conductor transistor.

[0067] Also in component structure as shown in drawing 8 , if suitable bias voltage is impressed, the discrete energy level formed in the granular magnetic layer 24 will shift, and as mentioned above, when it differs from the energy of the conduction electron of a ferromagnetic layer (30a), the tunnel current for which it depended on spin greatly flows. And a big magneto-resistive effect is acquired by reversing spin with the smaller coercive force among ferromagnetic layer 30a and the granular magnetic layer 24. In addition, in drawing 8 , a current is passed to a conductor 34 and it has the structure of reversing the spin of ferromagnetic layer 30a. 35 in drawing is an insulating layer. That is, the sense of spin can be judged from the magnitude of tunnel current only by impressing bias voltage to an electrode 33, without impressing an external magnetic field.

[0068] Like the conventional magneto-resistive effect component, the judgment of the sense of the spin by the component mentioned above can be used as the magnetic head or a magnetometric sensor, and is further applicable to storage information (spin information) read-out of a magnetic storage component. Moreover, although it is necessary to write in a ferromagnetic layer (or granular magnetic film) to use the spin dependence conduction component of this invention for a magnetic storage component, it makes a conductor approach through an insulating layer to a ferromagnetic layer (or granular magnetic layer), controls the sense of spin by the sense of the current passed to it, and should just set it to 1 and 0. Thus, the magnetic parts of this invention are constituted. Moreover, the various electronic parts with which the semi-conductor has been used conventionally can be similarly constituted using the spin dependence conduction component of this invention.

[0069] In addition, with the spin dependence conduction component of this invention, the substrate layer which consists of a magnetic material or a non-magnetic material, or OBAKO \*\*\*\* of non-magnetic material may be prepared. moreover, the spin dependence conduction component of this invention -- typical -- the shape of a thin film -- it is -- molecular beam epitaxy (MBE) -- it is producible using the usual thin film deposition systems, such as law, various spatters, and vacuum deposition. Furthermore, as a substrate for forming the cascade screen concerning this invention, a single crystal object, the polycrystalline

substance, etc., such as glass, ceramics, a metal, and a semi-conductor, can use the thing of arbitration. If Si substrate is used especially, the conventional semiconductor technology can be used, such as being easy to form a gate electrode, for example.

[0070]

[Example] Next, the concrete example and its assessment result of this invention are explained.

[0071] Structure shown in example 1 drawing 7 3 terminal component (spin transistor) was produced. The thin film formed membranes using the sputter altogether. First, on the thermal oxidation Si substrate 21, Cu film was formed as a conductor layer 22, and Fe of 20nm thickness and Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub> of 10nm thickness were successingly formed as ferromagnetic layer 23b and 23a film, respectively. Next, the granular magnetic layer 24 of 10nm of thickness was formed on this ferromagnetic layer 23, further, as an electrode 27 and 27', as Au film, the alumina insulator layer 28, an electrode 26, and 26', the Co<sub>9</sub> Fe alloy film was formed as Au film and a gate electrode 25, and the alumina insulator layer was formed as a protective coat 29, respectively. In addition, the component structure shown in drawing 7 was produced using the lift-off method.

[0072] a granular magnetic layer -- Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub> alloy and SiO<sub>2</sub> a target -- carrying out -- the bottom of Ar gas pressure 2mTorr and the conditions of substrate bias 400W -- Co<sub>80</sub> -- Pt<sub>20</sub> and SiO<sub>2</sub> The simultaneous sputter was carried out and it produced. The obtained film is SiO<sub>2</sub>. A Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub> alloy particle is abbreviation to inside. It checked having granular structure distributed in the shape of a layer at 50% of a rate by transmission electron microscope observation of a film cross section. The particle size of a Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub> alloy particle is abbreviation. 5nm and the distance between particles are abbreviation. It was 1.5nm. Moreover, it is coercive force as a result of performing magnetization measurement using a sample oscillatory type magnetometer. 6000e Greatly, the clear hysteresis was acquired and superparamagnetism-behavior was not observed.

[0073] Thus, it produced. 3 terminal component (spin transistor) was evaluated as follows. First, two electrodes 26 and the current I<sub>c</sub> which impresses an electrical potential difference among 27 and flows the granular magnetic layer 24 It measures and is bias voltage V<sub>G</sub> to the gate electrode 25 simultaneously. Current I<sub>C</sub> which impresses, tunnels the granular magnetic layer 24 and flows in the metal layer (magnetic film) 25 It measured as a function of bias voltage. Moreover, the sense of the spin of the ferromagnetic layer 23 was changed by changing a sink and its sense into a conductor layer 22 for a current in that case.

[0074] To drawing 9 , it is V<sub>G</sub>. Receiving I<sub>C</sub> Change is shown. In

addition, the spin of the ferromagnetic layer 23 and the granular magnetic layer 24 is mutually parallel here. VG \*\* -- the time of reaching a suitable value -- IC It is increasing rapidly and it is shown that resonance tunnel current flowed.

[0075] Drawing 10 is IC by the external magnetic field in VG = 0. Change is expressed as resistance change. Resistance changes with external magnetic fields a lot, and it is the rate of change, i.e., magnetic-reluctance rate-of-change (ratio of resistance change to the resistance under saturation magnetic field)  $\Delta R/R_s$ . It turns out [ 45% and ] that it is dramatically large. On the other hand, it is the magnetic-reluctance rate of change at the time of VG = 11mV. It was 15%. This shows that magnetic reluctance is controllable by gate voltage while showing that the spin dependence conduction component of this invention is applicable to the magnetic head, a magnetometric sensor, a magnetic storage component, etc.

[0076]

[Effect of the Invention] As explained above, according to the spin dependence conduction component of this invention, electric resistance can be controlled in the large range, and large magnetic-reluctance rate of change can be acquired easily in a small magnetic field. Therefore, it becomes possible by using the spin dependence conduction component of this invention to constitute the magnetic head, a field sensor, etc. of high sensitivity with large output voltage. Moreover, if it uses as a magnetic storage component, storage information can be read, without impressing an external magnetic field, and the solid-state MAG memory of a non-volatile with a large output can be offered at high speed. Furthermore, the spin dependence conduction component of this invention is applicable to various electronic parts and electronic instruments using the conventional semi-conductor from having a current amplification function.

---

## DESCRIPTION OF DRAWINGS

---

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] The basic configuration and ferromagnetism of the 1st spin dependence conduction component of this invention It is drawing for explaining the spin dependence resonant tunnelling effect of a double tunnel junction.

[Drawing 2] It is drawing showing typically other configurations of the 1st spin dependence conduction component of this invention.

[Drawing 3] It is drawing showing typically the modification of the spin dependence conduction component shown in drawing 1 .

[Drawing 4] It consists of the 2nd basic configuration and granular magnetic layer, and ferromagnetic layer of a spin dependence conduction component of this invention. It is drawing for explaining the spin dependence resonant tunnelling effect of a double resonance tunnel junction.

[Drawing 5] It is drawing showing typically other configurations of the 2nd spin dependence conduction component of this invention.

[Drawing 6] It is drawing showing typically the configuration of further others of the 2nd spin dependence conduction component of this invention.

[Drawing 7] The spin dependence conduction component of this invention was applied. It is the sectional view showing the example of 1 configuration of 3 terminal component (spin transistor).

[Drawing 8] The spin dependence conduction component of this invention was applied. It is the sectional view showing other examples of a configuration of 3 terminal component (spin transistor).

[Drawing 9] It is based on the example of this invention. Bias voltage  $V_G$  of 3 terminal component (spin transistor) Receiving tunnel current  $I_C$  It is drawing showing the measurement result of change.

[Drawing 10] It is based on the example of this invention. It is drawing showing the field dependency of the magnetic-reluctance rate of change of 3 terminal component (spin transistor).

[Description of Notations]

1 .... 1st ferromagnetic layer (1st electrode layer)

2 Four .... Dielectric layer (tunnel layer)

3 .... 2nd ferromagnetic layer

5 .... 3rd ferromagnetic layer (2nd electrode layer)

6, 7, 8, 16, 17, 18 .... Electrode

11 .... Ferromagnetic layer (1st electrode layer)

12 .... Granular magnetic layer

13 .... Non-magnetic metal layer (2nd electrode layer)

---

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-238924

(43) 公開日 平成11年(1999) 8 月31日

(51) Int.Cl.<sup>8</sup>

識別記号

F I

H 0 1 L 43/08

H 0 1 L 43/08

Z

G 0 1 R 33/09

G 1 1 B 5/39

G 1 1 B 5/39

H 0 1 F 10/08

H 0 1 F 10/08

G 0 1 R 33/06

R

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号

特願平10-39343

(22) 出願日

平成10年(1998) 2 月20日

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72) 発明者 猪俣 浩一郎

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株

式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 斉藤 好昭

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株

式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 岸 達也

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株

式会社東芝研究開発センター内

(74) 代理人 弁理士 須山 佐一

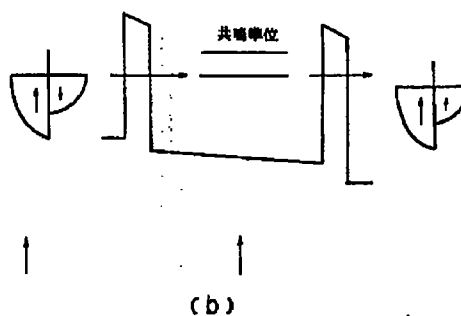
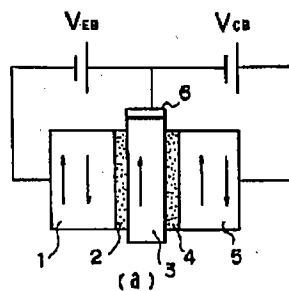
(54) 【発明の名称】 スピン依存伝導素子とそれを用いた電子部品および磁気部品

(57) 【要約】

【課題】 従来の電子伝導素子とは全く異なる電子のスピンを利用した電子伝導素子を提供する。極めて大きな磁気抵抗変化率が室温で得られ、さらに増幅機能を持たせたスピン依存伝導素子が求められている。

【解決手段】 1層以上の強磁性層3と、少なくとも1層が強磁性体からなる2層以上の電極層1、5と、これら強磁性層3および電極層1、5間に2重以上の多重トンネル接合を形成するように積層配置された誘電体層

(トンネル層) 2、4とを具備し、強磁性層3に離散的なエネルギー準位が形成されており、かつエネルギー準位を制御するための電極を有するスピン依存伝導素子である。あるいは、誘電体マトリックス中に分散させた強磁性微粒子を有するグラニューラー磁性層を介して多重トンネル接合を形成すると共に、グラニューラー磁性層に静電エネルギーに基づく離散的なエネルギー準位を形成する。





## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 1層以上の強磁性層と、少なくとも 1層が強磁性体からなる 2層以上の電極層と、前記強磁性層および電極層間に 2重以上の多重トンネル接合が形成されるように、前記強磁性層および電極層と交互に積層配置された誘電体または半導体からなる 2層以上のトンネル層とを具備し、前記強磁性層に離散的なエネルギー準位が形成されており、かつ前記エネルギー準位を制御するための電極を有することを特徴とするスピニ依存伝導素子。

【請求項 2】 誘電体マトリックス中に分散させた強磁性微粒子を有し、かつ保磁力を持つ 1層以上のグラニューラー磁性層と、前記グラニューラー磁性層との間に 2重以上の多重トンネル接合が形成されるように、前記グラニューラー磁性層と近接配置された少なくとも 1層が強磁性体からなる 2層以上の電極層とを具備し、前記グラニューラー磁性層に静電エネルギーに基づく離散的なエネルギー準位が形成されており、かつ前記エネルギー準位を制御するための電極を有することを特徴とするスピニ依存伝導素子。

【請求項 3】 請求項 1 または請求項 2 記載のスピニ依存伝導素子において、前記多重トンネル接合はスピニ依存共鳴トンネル効果を示すことを特徴とするスピニ依存伝導素子。

【請求項 4】 請求項 3 記載のスピニ依存伝導素子において、前記強磁性層と前記強磁性体からなる電極層のうち、一方のスピニの方向を変化させることにより、前記スピニ依存共鳴トンネル効果に基づく磁気抵抗効果を発現させることを特徴とするスピニ依存伝導素子。

【請求項 5】 請求項 3 記載のスピニ依存伝導素子において、前記グラニューラー磁性層と前記強磁性体からなる電極層のうち、一方のスピニの方向を変化させることにより、前記スピニ依存共鳴トンネル効果に基づく磁気抵抗効果を発現させることを特徴とするスピニ依存伝導素子。

【請求項 6】 請求項 1 または請求項 3 記載のスピニ依存伝導素子において、前記多重トンネル接合は電流増幅作用を有することを特徴とするスピニ依存伝導素子。

【請求項 7】 請求項 1 または請求項 3 記載のスピニ依存伝導素子において、2端子素子構造または 3端子素子構造を有することを特徴とするスピニ依存伝導素子。

【請求項 8】 請求項 1 ないし請求項 7 のいずれか 1 項記載のスピニ依存伝導素子を具備することを特徴とする電子部品。

【請求項 9】 請求項 1 ないし請求項 7 のいずれか 1 項記載のスピニ依存伝導素子を具備することを特徴とする磁気部品。

【請求項 10】 請求項 1 ないし請求項 7 のいずれか 1 項記載のスピニ依存伝導素子を具備することを特徴とす

る磁気ヘッド。

【請求項 11】 請求項 1 ないし請求項 7 のいずれか 1 項記載のスピニ依存伝導素子を具備することを特徴とする磁気記憶素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、強磁性体のトンネル効果を利用した磁気素子とその応用部品に係り、特に強磁性体中に形成された離散的なエネルギー準位を外部から制御するようにしたスピニ依存伝導素子とそれを用いた電子部品および磁気部品に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 スピニ依存伝導素子としては、これまでに巨大磁気抵抗効果素子（GMR素子）が知られている。磁気抵抗効果（MR）とは、ある種の磁性体に磁界を加えることにより電気抵抗が変化する現象であり、磁界センサや磁気ヘッドなどに利用されている。例えば、強磁性体を用いた磁気抵抗効果素子（MR素子）は温度安定性に優れ、かつ使用範囲が広いというような特徴を有している。

【0003】 従来より、磁性体を用いたMR素子にはパーマロイ合金などの薄膜が広く使用されてきた。これをハードディスクなどの再生ヘッドに使用することで高密度磁気記録が達成されている。しかし、パーマロイ薄膜の磁気抵抗変化率は 2~3%程度と小さいため、さらなる高密度記録を達成しようとすると十分な感度が得られないという問題があった。

【0004】 一方、近年磁気抵抗効果を示す新しい材料として、磁性金属層と非磁性金属層とを数オングストロームから数十オングストロームのオーダーの周期で交互に積層した構造を有し、非磁性層を介して相対する磁性層の磁気モーメントが反平行状態で磁気的に結合した人工格子膜が、巨大磁気抵抗効果を示す材料として注目されている。例えば、Fe/Cr人工格子膜(Phys. Rev. Lett. 61, 2472(1988))や、Co/Cu人工格子膜(J. Mag. Mater. 94, L1(1991)、Phys. Rev. Lett. 66, 2152(1991))などが見出されている。

【0005】 このような金属人工格子膜は、数 10%という従来のパーマロイ合金薄膜よりも格段に大きな磁気抵抗変化率を示す。このような巨大磁気抵抗効果は、伝導を担う電子の散乱が磁性層のスピニの向きに依存することに起因している。しかしながら、このような金属人工格子膜は、大きな磁気抵抗効果を得るためには積層数を多くする必要があるという問題や、飽和磁界（抵抗値が飽和する磁界）が数テスラ(T)以上と大きく、このままでは磁気ヘッドなどへの応用には不向きであるという問題を有している。

【0006】 飽和磁界を小さくする目的で、強磁性層／非磁性層／強磁性層のサンドイッチ構造の積層膜を有し、一方の強磁性層に交換バイアスを及ぼして磁化を固

定し、他方の強磁性層を外部磁界により磁化反転させることにより、2つの強磁性層の磁化方向の相対角度を変化させる、いわゆるスピバルブ膜が開発されている。しかし、スピバルブ膜は磁気抵抗変化率が4~8%程度とあまり大きくなく、また積層膜の比抵抗そのものが数 $10\mu\Omega\text{cm}$ と小さいため、外部磁界を検出するためには比較的大きな電流を流す必要があるという問題を有している。

【0007】また、多層膜に対して電流を膜面に垂直方向に流す、いわゆる垂直磁気抵抗効果を利用すると、非常に大きな磁気抵抗効果が得られることが知られている(Phys. Rev. Lett. 66, 3060(1991))。しかし、この場合には電流パスが小さく、また各層が金属であるために抵抗が小さく、サブミクロン以下に微細加工をしないと室温での磁気抵抗効果を測定できないという問題がある。

【0008】さらに、以上述べたような人工格子膜とは異なり、非磁性金属マトリックス中に磁性超微粒子を分散させた、いわゆるグラニュー磁性膜もスピに依存した伝導に基づく巨大磁気抵抗効果を示すことが見出されている(Phys. Rev. Lett. 68, 3745(1992))。このようなグラニュー磁性膜は、磁界を加えない状態では磁性超微粒子の性質により、各磁性超微粒子のスピは互いに不規則な方向を向いて抵抗が高く、磁界を加えて各スピを磁界の方向に揃えると抵抗が低下し、その結果スピ依存散乱に基づく磁気抵抗効果が発現する。しかし、この場合の磁性超微粒子は超常磁性を示すため、飽和磁界が本質的に非常に大きいという問題を有している。

【0009】一方、スピ依存散乱とはメカニズムを異にする、強磁性トンネル効果に基づく巨大磁気抵抗効果が見出されている。これは強磁性層/絶縁層/強磁性層の3層積層膜からなり、一方の強磁性層の保磁力が他方の強磁性層の保磁力よりも小さい構造において、両強磁性層間に電圧を印加してトンネル電流を発生させるものである。このとき、保磁力の小さい磁性層のスピのみを反転させると、2つの強磁性層のスピが互いに平行なときと反平行なときでトンネル電流が大きく異なるため、巨大磁気抵抗効果が得られる。

【0010】このような強磁性トンネル接合素子は構造が簡単であり、しかも室温で20%程度の大きな磁気抵抗変化率が得られるという特徴がある。しかしながら、トンネル効果を発現させるためには絶縁層の厚さを数nm以下と薄くする必要があり、そのような薄い絶縁層を均質に、しかも安定して作製することは困難であるため、抵抗や磁気抵抗変化率のバラツキが大きくなってしまいう問題がある。また、絶縁層の抵抗が高すぎると、これを磁気ヘッドなどに用いるために微細化した場合、一般に素子の高速動作が得られず、また雑音が増大してS/N比の大きい素子が得られないなどの問題が予測され

ている。

【0011】一方、スピバルブ膜や強磁性トンネル接合を利用した磁気記憶素子も知られている。この場合、2つの磁性層のうち一方を記録層とし、他方を読出し層としている。従って、記録、再生のいずれの場合にもスピを反転させる必要があり、そのための磁界印加用電流源が必要になる。

【0012】さらに、強磁性体を用いた3端子素子、いわゆるスピトランジスタと称するものが知られている。これは金属磁性体/金属非磁性体/金属磁性体の3層構造を有している。第1の金属磁性体と金属非磁性体との間に電圧を印加すると、第2の金属磁性体と金属非磁性体との間に出力電圧が発生し、かつその出力電圧は第1および第2の金属磁性体のスピが互いに平行なときと反平行なときで大きさが同じで符号が逆になるというものである(J. Appl. Phys. 79, 4727(1996))。しかし、このスピトランジスタは全て金属でできているため、出力電圧がナノボルト程度と非常に小さく、また電流増幅作用は有していない。

【0013】また、最近クーロンブロックード効果により磁気抵抗効果が増大することが見出されている(J. Phys. Soc. Jpn. 66, 1261(1997))。小さな容量をもつ2重トンネル接合において、電子を1個トンネルさせると $E_c = e^2/2C$ だけエネルギーが増大し、Cが小さければ $E_c$ は非常に大きくなり、電子1個とも言ってもトンネルできない。これをクーロンブロックードと言う。しかし、このようなクーロンブロックード状態でも高次のトンネル電流は流れ、これは協同トンネルと呼ばれる。この状態では、抵抗は2つのトンネル接合抵抗の積に比例するので、磁気抵抗効果は増大する。

【0014】従来から、電子あるいはホール伝導を利用した素子としては半導体素子が知られており、種々の電子回路やメモリ素子など、非常に多くの分野で利用されている。しかし、半導体素子は電子の電荷のみを利用したものであり、電子のスピは利用していない。

【0015】また、金属層と誘電体層、あるいは異なる半導体のヘテロエピタキシャル層からなる積層膜において、金属層あるいは半導体層に離散的なエネルギー準位が形成され、そのエネルギー準位を経由してトンネル伝導する、いわゆる共鳴トンネル効果を利用した素子も知られている。しかし、これらの素子も電子の電荷のみを利用したものであり、電子のスピは利用していない。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】 上述したように、これまでの電子伝導を利用した半導体素子や共鳴トンネル効果素子は、いずれも電子の電荷のみを利用したものであり、電子のスピは利用していない。

【0017】一方、電子のスピを利用した伝導素子としては、巨大磁気抵抗効果を示すスピバルブ素子、それを利用した磁気センサ、磁気ヘッド、磁気記憶素子、

あるいは強磁性トンネル接合を利用した磁気ヘッドや磁気記憶素子などが知られている。これらは磁気抵抗変化率が 10%未満と小さいために再生感度に限界があり、また出力電圧が小さいという問題を有している。特に、磁気記憶素子では記録、再生のいずれの場合にもスピンを反転させる必要があり、そのための磁界印加用の電流源が必要になるという煩雑さがある。

【0018】また、金属磁性体／金属非磁性体／金属磁性体の 3層構造を有する従来の 3端子素子（スピントランジスタ素子）は、出力電圧が極端に小さく実用化が困難であり、また電流増幅作用も有していない。

【0019】本発明は、従来の電子伝導素子とは全く異なる電子のスピンを利用した電子伝導素子を提供するものであり、しかも磁性体中に形成された離散的エネルギー準位を利用することで、極めて大きな磁気抵抗変化率が室温で得られ、さらにその離散的エネルギー準位を電圧によって制御することによって、増幅機能を持たせたスピン依存伝導素子を提供することを目的としている。さらには、そのようなスピン依存伝導素子を用いた電子部品および磁気部品を提供することを目的としている。

【0020】

【課題を解決するための手段】本発明者らは、強磁性微粒子を誘電体マトリックス中に分散させたグラニューラー磁性層と、このグラニューラー磁性層に近接配置された強磁性層との間にトンネル電流を流す磁気素子に関する研究を進めた結果、トンネル電流を制御することにより磁気抵抗を大幅に制御できることを見出した。さらに、これはスピン依存共鳴トンネル効果を起源とするものであることを検証した。本発明はこのような知見および検証結果に基づくものである。

【0021】上記したスピン依存共鳴トンネル効果は、2重以上の多重トンネル接合によるものである。従って、グラニューラー磁性層を用いた場合以外の、強磁性層と誘電体層あるいは強磁性層と半導体層からなる多重トンネル接合においても、同様の効果が得られる。スピン依存共鳴トンネル効果が発現するためには、多重トンネル接合における強磁性体の少なくとも一つに、離散的エネルギー準位が形成されなければならない。

【0022】本発明は上記したような新たな知見に基づくものであり、強磁性層（あるいはグラニューラー磁性層）内に生じた離散的エネルギー準位を外部電圧により制御する電極を設けたスピン依存伝導素子と、それを用いた応用部品、応用装置を提供するものである。

【0023】すなわち、本発明における第 1 のスピン依存伝導素子は、請求項 1 に記載したように、1層以上の強磁性層と、少なくとも 1層が強磁性体からなる 2層以上の電極層と、前記強磁性層および電極層間に 2重以上の多重トンネル接合が形成されるように、前記強磁性層および電極層と交互に積層配置された誘電体または半導体からなる 2層以上のトンネル層とを具備し、前記強磁

性層に離散的なエネルギー準位が形成されており、かつ前記エネルギー準位を制御するための電極を有することを特徴としている。

【0024】本発明における第 2 のスピン依存伝導素子は、請求項 2 に記載したように、誘電体マトリックス中に分散させた強磁性微粒子を有し、かつ保磁力を持つ 1層以上のグラニューラー磁性層と、前記グラニューラー磁性層との間に 2重以上の多重トンネル接合が形成されるように、前記グラニューラー磁性層と近接配置された少なくとも 1層が強磁性体からなる 2層以上の電極層とを具備し、前記グラニューラー磁性層に静電エネルギーに基づく離散的なエネルギー準位が形成されており、かつ前記エネルギー準位を制御するための電極を有することを特徴としている。

【0025】本発明のスピン依存伝導素子は、請求項 3 に記載したように、前記多重トンネル接合がスピン依存共鳴トンネル効果を示すことを特徴とするものである。さらに、請求項 4 および請求項 5 に記載したように、前記強磁性層（あるいはグラニューラー磁性層）と前記強磁性体からなる電極層のうち、一方のスピンの方向を変化させることにより、スピン依存共鳴トンネル効果に基づく磁気抵抗効果を発現させるものである。さらには、本発明のスピン依存伝導素子は、請求項 7 に記載したように、2端子素子構造および 3端子素子構造のいずれの構造とすることもできる。

【0026】また、本発明の電子部品および磁気部品は、請求項 8 および請求項 9 に記載したように、上述した本発明スピン依存伝導素子を具備することを特徴としている。同様に、本発明の磁気ヘッドおよび磁気記憶素子は、請求項 10 および請求項 11 に記載したように、上述した本発明スピン依存伝導素子を具備することを特徴としている。

【0027】

【発明の実施の形態】以下、本発明を実施するための形態について説明する。

【0028】まず、本発明のスピン依存伝導素子の基本構成および本発明の基本となるスピン依存共鳴トンネル効果について説明する。なお、以下では簡単のために 2重トンネル接合について、しかも誘電体を用いた場合について示す。この結果は多重トンネル接合および半導体を用いた場合に拡張できることは容易に考察できる。図 1 (a) は本発明の第 1 のスピン依存伝導素子の基本構成を示す図である。図 1 (a) に示すスピン依存伝導素子は、第 1 の強磁性層 1 / 誘電体層 2 / 第 2 の強磁性層 3 / 誘電体層 4 / 第 3 の強磁性層 5 からなる積層膜を有している。この積層膜においては、誘電体層 2、4 を介して、3層の強磁性層 1、3、5 間に 2重トンネル接合が形成されている。

【0029】3層の強磁性層 1、3、5 のうち、第 1 および第 3 の強磁性層 1、5 は電極層である。なお、後述

するように、トンネル電流の出口側に当る電極層 (5) は強磁性体に限らず、非磁性金属などで構成してもよい。また、第2の強磁性層3は2つの薄い誘電体層2、4、すなわち2つのトンネル層によって挟まれており、各誘電体層2、4を介して第1の強磁性層1と第3の強磁性層5との間にそれぞれトンネル電流が流れるように構成されている。なお、図中6は電極である。

【0030】このような構造において、第2の強磁性層3が十分に薄い場合には、図1(b)に示すように、量子効果により第2の強磁性層3にスピンの依存した離散的なエネルギー準位が形成される。すなわち、第2の強磁性層3の離散的なエネルギー準位は交換相互作用のためにスピン分裂しており、上向きスピン(↑)と下向きスピン(↓)ではエネルギーが交換エネルギー $\gamma$ の分だけ異なっている。

【0031】今、図1(a)に示したように、第1の強磁性層1と第2の強磁性層3との間に電圧を印加すると共に、第2の強磁性層3と第3の強磁性層5との間に逆符号の電圧を印加する。すると、薄い誘電体層(トンネル層)2を介して第1の強磁性層1と第2の強磁性層3との間にトンネル電流が流れる。そして、第1の強磁性層1と第3の強磁性層5に加えた電圧 $V$ が適当な値のとき、第2の強磁性層3内の上向きスピン(↑)または下向きスピン(↓)の離散的エネルギー準位のうちの1つ(図1(b)では↑スピン)が第1の強磁性層1の伝導電子のエネルギーと同じレベル(共鳴状態)になる。

【0032】そうすると、共鳴状態にある離散的エネルギー準位のスピンと同じ向きのスピンを持つ第1の強磁性層1中の伝導電子は、誘電体層2、4により反射されることなく、100%の透過率をもって第1の強磁性層1から第3の強磁性層5へトンネル伝導することができる。一方、それとは反対のスピンを持つ伝導電子は、トンネル伝導することができない。これがスピン依存共鳴トンネル効果である。

【0033】強磁性体ではフェルミ準位近傍の電子のみが伝導に寄与し、しかもその伝導電子の数はスピンによって異なる。従って、第1の強磁性層1と第2の強磁性層3の磁化が互いに平行なときと反平行なときでは、共鳴準位を経てトンネルする電子の数が異なる。それゆえ、例えば第2の強磁性層3の磁化を固定し、第1の強磁性層1の磁化を反転させれば、両者でトンネル電流が大きく異なるため、スピン依存共鳴トンネル効果に基づく非常に大きな磁気抵抗効果が得られる。第3の強磁性層5からなる電極層はトンネル電流が流れ得るものであればよく、強磁性体に限らず非磁性金属などからなる電極層を使用することができる。

【0034】図1は半導体を用いたトランジスタに相当し、第1の強磁性層1がエミッタ、第2の強磁性層3がベース、第3の強磁性層(あるいは非磁性電極層)5がコレクタに対応する。すなわち、エミッタ(1)とベー

ス(3)に電圧 $V_{EB}$ を印加するとベース電流 $I_B$ が流れ、ベース(3)とコレクタ(5)に逆電圧 $V_{CB}$ を印加するとコレクタ電流 $I_C$ が流れる。コレクタ電流 $I_C$ はベース電流 $I_B$ よりも大きくなり、電流増幅作用を示す。

【0035】これまでは第2の強磁性層3のスピンの第1の強磁性層1のスピンの対して平行および反平行の場合について説明したが、一般に角度 $\theta$ をなす場合には $\cos\theta$ に比例したトンネル電流が得られるので、電流値によってスピンの相対角度 $\theta$ を検出することができる。このように、バイアス電圧 $V_{CB}$ を制御することによって、スピンの向きを決定することができ、また電流増幅作用を得ることができる。これらの機能によって、本発明のスピン依存伝導素子は真の意味でのスピントランジスタということができる。

【0036】本発明の第1のスピン依存伝導素子は、半導体素子における電界効果型トランジスタ(FET)のように、第2の強磁性層3にバイアス電圧を印加するための電極を設けた構成とすることもできる。図2はそのような構成の一例を示している。第2の強磁性層3には、バイアス電圧を印加するための電極7が設けられている。このような構成において、第1の強磁性層(第1の電極層)1と第3の強磁性層(第2の電極層/非磁性層であってもよい)との間に電圧を印加してトンネル電流を流し、電極7から第2の強磁性層3にバイアス電圧を印加して第2の強磁性層3の離散的エネルギー準位を制御(シフト)することによって、スピン依存共鳴状態を生じさせることができる。

【0037】さらに、本発明の第1のスピン依存伝導素子において、離散的エネルギー準位を形成する強磁性層(図1では第2の強磁性層3)は1層に限られるものではなく、例えば図3に示すように中間の強磁性層3を多層構造(3a、3b、…3n)とすると共に、これら各強磁性層3a、3b、…3nを誘電体層9と交互に積層配置して、3重以上の多重トンネル接合を有する構成とすることもできる。このような構成においても、中間の強磁性層3の離散的エネルギー準位を制御することによって、スピン依存共鳴状態を生じさせることができる。

【0038】図1～3に示したスピン依存伝導素子において、強磁性層1、3、5の構成材料は特に限定されるものではなく、パーマロイに代表されるFe-Ni合金、強磁性を示すFe、Co、Niおよびそれらを含む合金、NiMnSb、PtMnSbのようなホイスラー合金などのハーフメタル、CrO<sub>2</sub>、マグネタイト、Mnペロブスカイトなどの酸化物系のハーフメタル、アモルファス合金などの種々の軟磁性材料から、Co-Pt合金、Fe-Pt合金、遷移金属-希土類合金などの硬磁性材料まで、種々の強磁性材料を使用することができる。

【0039】また、第1および第2の強磁性層1、3の

うち、例えば第1の強磁性層1のスピンの方向のみを変化させるためには、例えば強磁性体の保磁力の差を利用してもよいし、また反強磁性膜を積層配置して交換結合により強磁性層の磁化を固定するようにしてもよい。第2の強磁性層3の厚さは、上述したように量子効果によりスピンの依存した離散的なエネルギー準位が形成されるような厚さ、具体的には5nm以下程度とする。第1および第3の強磁性層1、5の厚さは特に限定されるものではなく、例えば0.1~100nm程度とすることが好ましい。

【0040】さらに、上述した実施形態ではトンネル層として誘電体層2、4を用いた場合について説明したが、この誘電体層2、4に代えて半導体層をトンネル層として使用しても同様なスピン依存伝導素子を構成することができ、また同様な作用・効果が得られる。トンネル層として用いる誘電体および半導体は特に限定されるものではなく、種々の誘電体材料および半導体材料を使用することができる。また、トンネル層の厚さは0.5~5nm程度とすることが好ましい。

【0041】上述した実施形態では、強磁性体と誘電体（または半導体）との2重以上の多重トンネル接合を有するスピン依存伝導素子について説明したが、非磁性の誘電体マトリックス中に強磁性微粒子を分散させたグラニューラー磁性層を用いた場合においても、同様なスピン依存共鳴トンネル効果を室温で得ることができる。これが本発明の第2のスピン依存伝導素子である。

【0042】すなわち、図4(a)に示すスピン依存伝導素子は、強磁性体からなる第1の電極層11/グラニューラー磁性層12/非磁性体からなる第2の電極層13からなる積層膜を有している。この積層膜において、グラニューラー磁性層12は誘電体マトリックス14中に強磁性微粒子15を分散させたものであり、このグラニューラー磁性層12は超常磁性を示さず、有限の保磁力を持つ強磁性体である。このグラニューラー磁性層12を挟んで、第1の電極層11と第2の電極層13とが近接配置されており、第1の電極層11とグラニューラー磁性層12およびグラニューラー磁性層12と第2の電極層13との間に、それぞれトンネル電流が流れるように構成されている。すなわち、グラニューラー磁性層12と電極層11、13との間には2重トンネル接合が形成されている。

【0043】なお、第2の電極層13は非磁性体に限らず強磁性体で構成してもよい。すなわち、第1および第2の電極層11、13のうち、少なくとも第1の電極層11を強磁性体で構成すればよい。また、電極層11、13とグラニューラー磁性層12とは直接積層配置することに限らず、それらの間にトンネル電流が流れる程度の厚さの絶縁膜を介在させてもよい。

【0044】このような構造において、グラニューラー磁性層12に設けた電極16を通して、第1の電極層（強

磁性体）11とグラニューラー磁性層12との間に電圧 $V_{EB}$ を印加する。そして、グラニューラー磁性層12と第2の電極層（非磁性体）13との間に逆符号の電圧 $V_{CB}$ を印加する。ここで、グラニューラー磁性層12中の強磁性微粒子15の大きさは十分に小さく、また周囲を誘電体マトリックス14によって囲まれているため、クーロンブロック効果によって強磁性微粒子15のエネルギー準位は、静電エネルギー $E_C = e^2 / 2C$ （ $e$ は電子の電荷、 $C$ は粒子の容量）のために、図4(b)に示すように量子化されて離散的になる。

【0045】従って、前述した第1の実施形態と同様に、適当な値のバイアス電圧 $V_{CB}$ を印加すると、グラニューラー磁性層と第1の電極層（強磁性層）11との間に共鳴トンネル準位が形成される。そして、共鳴状態にあるときは磁気抵抗が小さく、共鳴から外れるとクーロンブロック効果により大きな磁気抵抗効果が得られる。よって、電極16により磁性粒子の静電エネルギー準位を共鳴状態からはずすように制御し、例えばグラニューラー磁性層12の磁化を固定し、強磁性層11の磁化を反転させれば、両者でトンネル電流が大きく異なるため、非常に大きな磁気抵抗効果が得られる。

【0046】一方、電極16により磁性粒子の静電エネルギー準位を共鳴状態によるように制御するとクーロンブロック効果が消失し、磁気抵抗効果は減少する。このように、電極16に加える電圧を制御することで、磁気抵抗効果を制御できるという新しい機能を持たせることができる。

【0047】第2のスピン依存伝導素子においても、前述した第1のスピン依存伝導素子と同様に、強磁性層11とグラニューラー磁性層12とのスピンの相対角度を検出することができる。また、図5に示すように、表面に絶縁層19を有する基板18上に形成したグラニューラー磁性層12にバイアス電圧を印加するための電極17を設けた構造とすることもできる。すなわち、第1の電極層11と第2の電極層13との間に電圧を印加してトンネル電流を流し、電極17からグラニューラー磁性層12にバイアス電圧を印加してグラニューラー磁性層12中の離散的なエネルギー準位を制御することにより、共鳴状態を生じさせることができる。この際、グラニューラー磁性層12は図6に示すように、単一の強磁性微粒子で量子ドットを形成しているものであってもよい。図4に示した素子についても同様である。

【0048】さらに、本発明の第2のスピン依存伝導素子において、グラニューラー磁性層は1層に限られるものではなく、グラニューラー磁性層と強磁性層とをさらに多層積層した積層膜を適用することも可能である。このような構成においても、グラニューラー磁性層の離散的なエネルギー準位を制御することによって、スピン依存共鳴状態を生じさせることができる。

【0049】図4~図6に示したスピン依存伝導素子に

において、グラニュー磁性層12は超常磁性を示さず、有限の保磁力を有する強磁性体であるため、従来のグラニューGMR材料のような飽和磁界が大きいという問題はない。また、グラニュー磁性層12は誘電体マトリックス14中に磁性微粒子15を分散させているため、誘電体層をもつ強磁性トンネル接合に比べて電気抵抗が小さく、さらにグラニュー磁性層12の電流パス方向（膜厚方向あるいは膜面内方向）の長さ、磁性微粒子15の体積充填率、大きさ、分散状態などを制御することによって、電気抵抗を適当な値に制御できるという特徴を有している。このため、応用に応じてスピン依存伝導素子の電気抵抗を容易に調整することができる。

【0050】グラニュー磁性層12は、上述したように超常磁性体でなく、有限の保磁力を持つ必要がある。誘電体マトリックス中に磁性微粒子を分散させたグラニュー磁性材料では、バルクに比べて一般に保磁力がかなり小さくなるので、それを防ぐために、磁性微粒子15には特に磁気異方性の大きいCo、Co-Pt合金、Fe-Pt合金、遷移金属-希土類合金などを用いることが望ましい。また、トンネル障壁を一定にする意味から、これらの磁性微粒子15は層状に配列していることが望ましい。これらは2層以上に配列させてもよい。

【0051】また、保磁力があまり大きくないグラニュー磁性材料を使用する場合には、グラニュー磁性層の両端部に一對の硬磁性膜を隣接配置し、この硬磁性膜からバイアス磁界を印加することによりスピンを固定してもよい。バイアス磁界印加膜としては硬磁性膜に限らず、FeMnやIrMnなどの反強磁性膜を使用することもできる。

【0052】グラニュー磁性層12における磁性微粒子15の粒径は、超常磁性にならない程度の大きさ、具体的には1nm以上とすることが望ましい。ただし、あまり磁性微粒子15が大きいと粒子間隔が増大するため、磁性微粒子7の粒径は10nm以下程度とすることが好ましい。磁性微粒子15の間隔は、それらの間でトンネル電流が流れるように5nm以下程度とすることが好ましい。

【0053】また、誘電体マトリックス14としては、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $MgO$ 、 $MgF_2$ 、 $Bi_2O_3$ 、 $AlN$ 、 $CaF_2$ などの種々の誘電体材料を使用することができ、このような誘電体膜中に上記したような磁性微粒子15を分散させることでグラニュー磁性層12が得られる。なお、上記した酸化膜、窒化膜、フッ化膜などでは、それぞれの元素の欠損が一般的に存在するが、そのような誘電体膜であっても何等问题はない。

【0054】一方、強磁性層11としてはグラニュー磁性層12との間で保磁力に大小関係を有していればよく、例えばパーマロイに代表されるFe-Ni合金、強磁性を示すFe、Co、Niおよびそれらを含む合金、NiMnSb、PtMnSbのようなホイスラー合金な

どのハーフメタル、 $CrO_2$ 、マグネタイト、Mnペロブスカイトなどの酸化物系のハーフメタル、アモルファス合金などの種々の軟磁性材料から、Co-Pt合金、Fe-Pt合金、遷移金属-希土類合金などの硬磁性材料まで、種々の強磁性材料を使用することができる。

【0055】例えば、ハーフメタルは一方のスピンバンドにエネルギーギャップが存在するので、一方のスピンを持つ電子しか伝導に寄与しない。従って、このような材料を強磁性層11として使用することで、より大きな磁気抵抗効果を得ることができる。なお、第2の電極層13に強磁性体を使用する場合、第1の電極層（強磁性体）11と必ずしも同じ材料である必要はなく、グラニュー磁性層12と保磁力の違いがあればよい。

【0056】強磁性層11は単層構造に限らず、非磁性層を介して配置した2つの強磁性層を有し、これら強磁性層の磁化を互いに反平行となるように結合させた積層膜であってもよい。このような反平行に結合させた積層膜によれば、強磁性層から磁束が外部に漏れることを防ぐことができ、好ましい形態といえることができる。このような反平行に結合した強磁性層を得るためには、強磁性層と非磁性層とを交互に積層し、交換結合や静磁結合を利用すればよい。

【0057】さらに、強磁性層と半導体層とを交互に積層した積層膜を、強磁性層11として用いることもできる。この場合には、熱や光照射によりスピンを反転させることができるため、磁界が不要になるという特徴がある。すなわち、例えば光や熱で記録し、バイアス電圧を印加することで読み出す、新しいメモリなどが実現できる。このような積層膜に用いる半導体としては、 $B_{20}$ 構造のFeSi合金や $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>、GaAsなどを用いることができる。

【0058】グラニュー磁性層12および強磁性層11は、それぞれ膜面内に一軸磁気異方性を有することが望ましい。これによって、急峻な磁化反転を起こすことができると共に、磁化状態を安定して保持することができる。これらは特に磁気記憶素子に適用する場合に有効である。また、グラニュー磁性層12および強磁性層11の膜厚は0.5～100nmの範囲とすることが好ましい。このうち、グラニュー磁性層12の膜厚はできるだけ薄い方が好ましいが、作製上均一な膜厚を維持することができ、またトンネル電流に対して悪影響を及ぼさない膜厚であればよく、例えば50nm以下であればよい。

【0059】上述した各実施形態においては、本発明の第1および第2のスピン依存伝導素子を3端子素子として利用する場合について主として説明したが、本発明のスピン依存伝導素子は2端子素子とすることもできる。例えば、図1～図3に示したスピン依存伝導素子および図4～図5に示したスピン依存伝導素子において、第1および第2の電極層間（強磁性層間あるいは強磁性層と非磁性層間）に電圧を印加し、その間の電流を測定すれ

ば、印加電圧が適当な値のときにスピン依存共鳴状態を生じさせることができる。このように、本発明のスピン依存伝導素子は2端子素子構造および3端子素子構造のいずれにも適用可能である。

【0060】以上説明したように、本発明のスピン依存伝導素子は電流増幅作用を有し、かつバイアス電圧が半導体トランジスタに比べて非常に小さく、従って省電力化できる。また、基本的に金属を用いているので、伝導電子の数が半導体に比べて圧倒的に多い。よって、素子サイズが微細化してもキャリアの数が多いため問題ないというような特徴を有する。本発明のスピン依存伝導素子は、磁気抵抗効果型磁気ヘッド、磁界センサ、磁気記憶素子などの磁気抵抗効果を利用した磁気部品および電子部品に限らず、半導体を用いたトランジスタと同様の機能を有することから、半導体を用いられてきた種々の電子部品や電子装置に適用することが可能である。また、半導体トランジスタなどの従来の半導体素子と組み合わせ使用することも可能である。

【0061】次に、本発明のスピン依存伝導電子の具体的な素子構造について、図7および図8を参照して、3端子素子を例として説明する。なお、図7および図8ではグラニューラー磁性層を用いたスピン依存伝導素子を示したが、強磁性層に離散的エネルギー準位が形成されるスピン依存伝導素子も同様な素子構造とすることができる。

【0062】まず、図7に示す3端子構造のスピン依存伝導電子は、基板21上に導体層22、強磁性層23(23a、23b)、グラニューラー磁性層24および金属層25が順に積層されている。すなわち、グラニューラー磁性層24が強磁性層23aとゲート電極25とにより挟まれた構造を有している。

【0063】ここで、強磁性層23bは強磁性層23aにバイアス磁界を印加し、その保磁力を小さくする機能をもたせたものであり、特に形成しなくてもよい。導体層22はそれに流す電流の向きを変えることによって、強磁性層23のスピンの向きを制御する役割を有する。グラニューラー磁性層24には2つの電極26、27によりバイアス電圧が印加されるようになっている。なお、図中28は絶縁膜、29は保護膜を兼ねた絶縁膜である。なお、電極26、26'および電極27、27'はそれぞれ一方のみであってもよい。

【0064】グラニューラー磁性層24中の磁性微粒子はサイズが小さく、そのためクーロンブロッケード効果によって静電エネルギーに基づく離散的エネルギー準位が形成されている。このような構造において、電極27と電極26の間(または電極27'と電極26'の間)に電圧を印加するとトンネル電流が流れる。そして、ゲート電極25にバイアス電圧を印加すると、グラニューラー磁性層24の静電エネルギー準位を制御擦ることができる。

【0065】この際、バイアス電圧を適当な値に制御すると、前述したようにグラニューラー磁性層24に形成された離散的エネルギー準位がシフトし、強磁性層23の伝導電子のエネルギーと異なるように設定できる。そして、強磁性層23のスピンを反転させることによって、大きな磁気抵抗効果が得られる。一方、離散的エネルギー準位を強磁性層23の伝導電子のエネルギーと同レベルに制御すると共鳴トンネル効果が生じ、このとき磁気抵抗は大きく減少する。すなわち、外部磁界を印加することなく、バイアス電圧を印加するだけで、トンネル電流の大きさからスピンの向きを判定することができる。

【0066】図7は強磁性層とグラニューラー磁性層とを基板面に対して垂直方向に積層した素子構造であるが、図8に示すように、グラニューラー磁性層24を少なくとも一方が強磁性体からなる電極(30a、30b)で挟み、それらが基板面に対してプレーナ型に配置された構造とすることも可能である。この場合、基板21表面には絶縁層31を形成し、この絶縁層31を介してグラニューラー磁性層24を形成する。このグラニューラー磁性層24上には薄い絶縁層32を介して電極33を形成し、電極33と基板21との間にバイアス電圧を印加する。これは半導体トランジスタでいうところのFETに相当する。

【0067】図8に示すような素子構造においても、適当なバイアス電圧を印加するとグラニューラー磁性層24に形成された離散的エネルギー準位がシフトし、上述したように強磁性層(30a)の伝導電子のエネルギーと異なるとき大きくスピンに依存したトンネル電流が流れる。そして、強磁性層30aとグラニューラー磁性層24のうち、保磁力の小さい方のスピンを反転させることによって大きな磁気抵抗効果が得られる。なお、図8では導体34に電流を流して、強磁性層30aのスピンを反転させる構造になっている。図中35は絶縁層である。すなわち、外部磁場を印加することなく、電極33にバイアス電圧を印加するだけで、トンネル電流の大きさからスピンの向きを判定することができる。

【0068】上述した素子によるスピンの向きの判定は、従来の磁気抵抗効果素子と同様に、磁気ヘッドや磁気センサとして利用することができ、さらには磁気記憶素子の記憶情報(スピン情報)読み出しに利用することができる。また、本発明のスピン依存伝導素子を磁気記憶素子に用いる場合には、強磁性層(あるいはグラニューラー磁性膜)に書き込みを行う必要があるが、それは強磁性層(あるいはグラニューラー磁性層)に対して絶縁層を介して導体を近接させ、それに流す電流の向きによりスピンの向きを制御し、それを1、0とすればよい。このようにして、本発明の磁気部品が構成される。また同様に、本発明のスピン依存伝導素子を用いて、従来半導体を用いられてきた種々の電子部品を構成することができる。

【0069】なお、本発明のスピン依存伝導素子では、磁性材料または非磁性材料からなる下地層、または非磁性体のオーバーコート層などを設けてもよい。また、本発明のスピン依存伝導素子は典型的には薄膜状であり、分子線エビタキシー（MBE）法、各種スパッタ法、蒸着法など通常の薄膜形成装置を用いて作製することができる。さらに、本発明に係わる積層膜を成膜するための基板としては、ガラス、セラミックス、金属、半導体などの単結晶および多結晶など、任意のものを用いることができる。特に、Si基板を用いれば、例えばゲート電極を形成し易いなど、従来の半導体技術を利用することができる。

【0070】

【実施例】次に、本発明の具体的な実施例およびその評価結果について説明する。

【0071】実施例1

図7に示した構造の3端子素子（スピントランジスタ）を作製した。薄膜は全てスパッタ法を用い成膜した。まず、熱酸化Si基板21上に導体層22としてCu膜を成膜し、引き続き強磁性層23b、23a膜としてそれぞれ20nm厚のFeおよび10nm厚のCo<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>を形成した。次に、この強磁性層23上に膜厚10nmのグラニューラー磁性層24を形成し、さらに電極27、27'としてAu膜、アルミナ絶縁膜28、電極26、26'としてAu膜、ゲート電極25としてCo<sub>9</sub>Fe合金膜、保護膜29としてアルミナ絶縁膜をそれぞれ成膜した。なお、図7に示した素子構造はリフトオフ法を用いて作製した。

【0072】グラニューラー磁性層は、Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>合金とSiO<sub>2</sub>をターゲットとして、Arガス圧2mTorr、基板バイアス400Wの条件下で、Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>とSiO<sub>2</sub>を同時スパッタして作製した。得られた膜は、SiO<sub>2</sub>中にCo<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>合金粒子が約50%の割合で層状に分散したグラニューラー構造になっていることを、膜断面の透過型電子顕微鏡観察により確認した。Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>合金粒子の粒径は約5nm、粒子間距離は約1.5nmであった。また、試料振動型磁力計を用いて磁化測定を行った結果、保磁力は600Oeと大きく、また明瞭なヒステリシスが得られ、超常磁性的挙動は観測されなかった。

【0073】このようにして作製した3端子素子（スピントランジスタ）を以下のようにして評価した。まず、2つの電極26、27間に電圧を印加してグラニューラー磁性層24を流れる電流 $I_c$ を測定し、同時にゲート電極25にバイアス電圧 $V_g$ を印加し、グラニューラー磁性層24をトンネルして金属層（磁性膜）25に流れる電流 $I_c$ をバイアス電圧の関数として測定した。また、その際に導体層22に電流を流し、その向きを変えることによって、強磁性層23のスピンを向きを変えた。

【0074】図9に、 $V_g$ に対する $I_c$ の変化を示す。なお、ここでは強磁性層23とグラニューラー磁性層24

のスピンは互いに平行である。 $V_g$ が適当な値に達したとき $I_c$ が急増しており、共鳴トンネル電流が流れたことを示している。

【0075】図10は、 $V_g = 0$ の場合の外部磁場による $I_c$ の変化を抵抗変化として表したものである。外部磁界により抵抗が大きく変化し、その変化率すなわち磁気抵抗変化率（飽和磁場下における抵抗に対する抵抗変化の比） $\Delta R/R_S$ は、45%と非常に大きいことが分かる。一方、 $V_g = 11\text{mV}$ のときの磁気抵抗変化率は15%であった。これは本発明のスピン依存伝導素子を磁気ヘッド、磁気センサ、磁気記憶素子などに適用できることを示していると共に、ゲート電圧によって磁気抵抗を制御できることを示している。

【0076】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のスピン依存伝導素子によれば、電気抵抗を広い範囲で制御することができ、かつ小さな磁場で大きい磁気抵抗変化率を容易に得ることができる。従って、本発明のスピン依存伝導素子を用いることによって、出力電圧の大きい高感度の磁気ヘッドや磁界センサなどを構成することが可能になる。また、磁気記憶素子として利用すれば、外部磁界を印加することなく記憶情報を読み出すことができ、かつ高速で出力の大きい不揮発性の固体磁気メモリを提供することができる。さらに、本発明のスピン依存伝導素子は電流増幅機能を有することから、従来の半導体を用いた種々の電子部品や電子装置に適用することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1のスピン依存伝導素子の基本構成および強磁性2重トンネル接合のスピン依存共鳴トンネル効果を説明するための図である。

【図2】 本発明の第1のスピン依存伝導素子の他の構成を模式的に示す図である。

【図3】 図1に示すスピン依存伝導素子の変形例を模式的に示す図である。

【図4】 本発明の第2のスピン依存伝導素子の基本構成およびグラニューラー磁性層と強磁性層とからなる2重共鳴トンネル接合のスピン依存共鳴トンネル効果を説明するための図である。

【図5】 本発明の第2のスピン依存伝導素子の他の構成を模式的に示す図である。

【図6】 本発明の第2のスピン依存伝導素子のさらに他の構成を模式的に示す図である。

【図7】 本発明のスピン依存伝導素子を適用した3端子素子（スピントランジスタ）の一構成例を示す断面図である。

【図8】 本発明のスピン依存伝導素子を適用した3端子素子（スピントランジスタ）の他の構成例を示す断面図である。

【図9】 本発明の実施例による3端子素子（スピント



ランジスタ) のバイアス電圧  $V_G$  に対するトンネル電流  $I_C$  の変化の測定結果を示す図である。

【図 10】 本発明の実施例による 3 端子素子 (スピントランジスタ) の磁気抵抗変化率の磁界依存性を示す図である。

【符号の説明】

1 ……第 1 の強磁性層 (第 1 の電極層)

2、4 ……誘電体層 (トンネル層)

3 ……第 2 の強磁性層

5 ……第 3 の強磁性層 (第 2 の電極層)

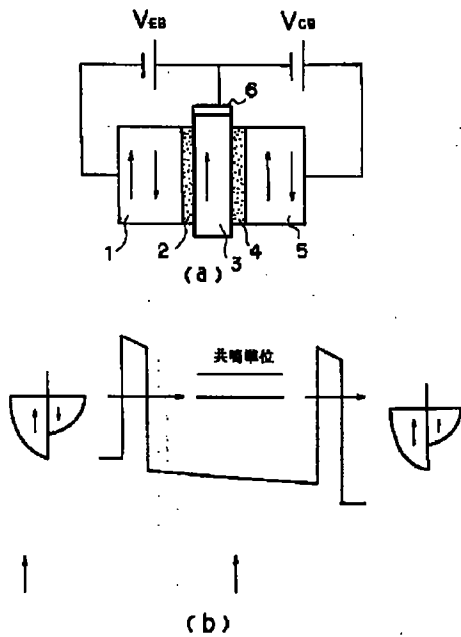
6、7、8、16、17、18 ……電極

11 ……強磁性層 (第 1 の電極層)

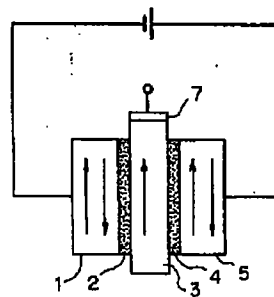
12 ……グラニューラー磁性層

13 ……非磁性金属層 (第 2 の電極層)

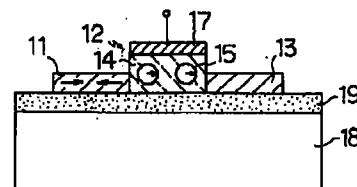
【図 1】



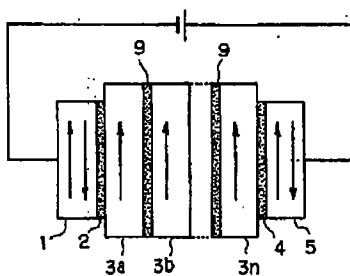
【図 2】



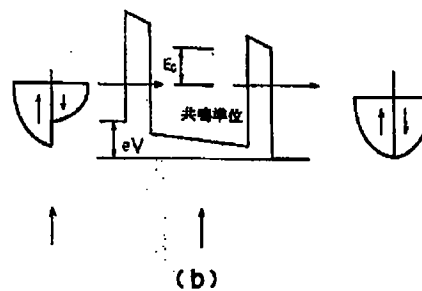
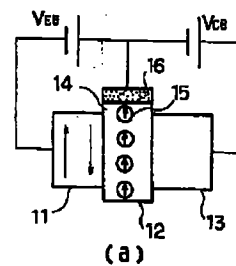
【図 5】



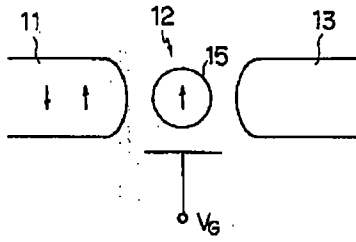
【図 3】



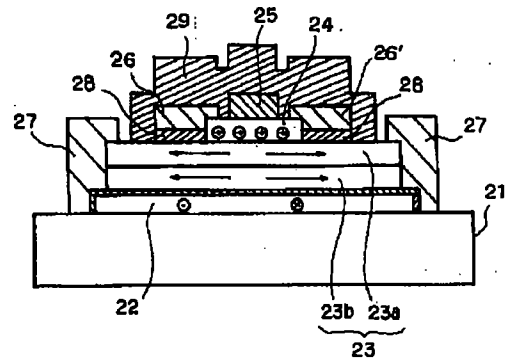
【図 4】



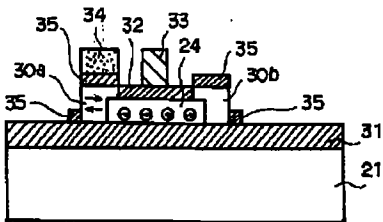
【図6】



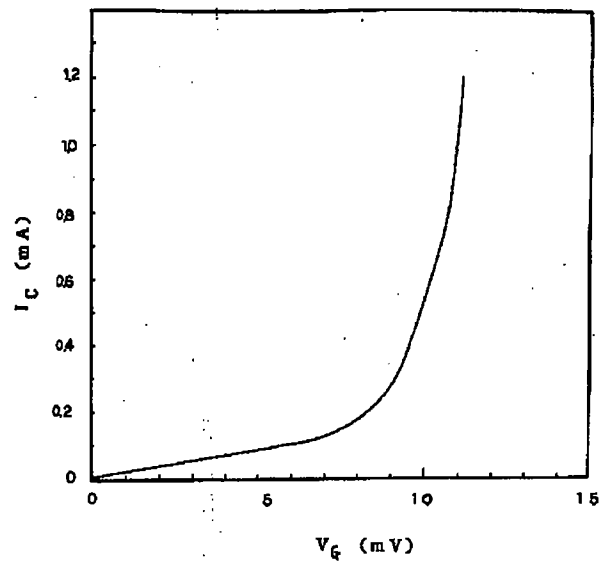
【図7】



【図8】



【図9】



【図10】

